

## **Karakteristik Gain kaca TZB yang didadah Ion $\text{Er}^{3+}$ untuk penguat pada sistem komunikasi Optik**

**Rudi Susanto<sup>1</sup>, Herliyani Hasanah<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Prodi Teknik Informatika, STMIK Duta Bangsa Surakarta, Surakarta 57154, Indonesia

E-mail: rudist87@gmail.com; herlydb@gmail.com

Received: 14 05 2018. Revised: 10 08 2018. Accepted: 23 08 2018

### **Abstrak**

Paper ini menyajikan karakteristik gain pada kaca tellurite dengan komposisi  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}43\text{-x)ZnO-xEr}_2\text{O}_3$  dimana ( $x=0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$ ). Serapan optik kaca diukur menggunakan Ultra Violet-Visible Spectroscopy (UV-Vis)  $\lambda$  25. Pengukuran dilakukan pada panjang gelombang 400 nm sampai dengan 1100 nm dengan range 0,1 nm. Pola cross section emisi serta absorpsi kaca didapat dengan menggunakan persamaan McCumber kemudian digunakan untuk menentukan gain cross section. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penguatan muncul saat rasio inversi mencapai 0,4 atau lebih karena emisi lebih dominan dan dapat mengimbangi absorpsi. Berdasarkan hasil penelitian urutan tinggi intensitas puncak gain cross section pada berbagai rasio inversi dari tinggi ke rendah adalah  $x=3,0 > x=1,0 > x=2,5 > x=1,5 > x=0,5 > x=2,0$ .

**Kata Kunci:** gain; kaca Tellurite; Mc Cumber; cross section

### ***Gain characteristics of $\text{Er}^{3+}$ doped TZB Glass for Optical amplifiers in Optical communications systems***

### **Abstract**

*This paper presents the gain characteristics of glass with the composition  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}43\text{-x)ZnO-xEr}_2\text{O}_3$  where ( $x = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ ). Glass optical absorption is measured using Ultra Violet-Visible Spectroscopy (UV-Vis)  $\lambda$  25. Measurements are made at wavelengths of 400 nm to 1100 nm with a range of 0.1 nm. The pattern of cross section emission and glass absorption obtained by using the McCumber equation is then used to determine the gain cross section. The results show that strengthening occurs when the inversion ratio reaches 0.4 or more because emissions are more dominant and can offset the absorption. Based on the results of the research the high order of peak intensity of cross section gain on various inversion ratio from high to low is  $x = 3.0 > x = 1.0 > x = 2.5 > x = 1.5 > x = 0.5 > x = 2.0$ .*

**Keywords:** gain; Tellurite glass; Mc Cumber; cross section

---

## **PENDAHULUAN**

Sistem Komunikasi Optik merupakan suatu metode untuk mentransmisikan sebuah informasi dari satu tempat ke tempat yang lain dengan mengirimkan sinar atau cahaya melalui serat optik. Pada sistem komunikasi optik jarak transmisi dibatasi oleh adanya rugi-rugi transmisi, yang disebabkan oleh kehilangan daya karena faktor dispersi dan

losses (Susanto & Hasanah, 2017). Oleh sebab itu diperlukan optical amplifier dalam sistem komunikasi optik untuk transmisi jarak jauh. Mengingat pentingnya keberadaan optical amplifier maka penelitian material optical amplifier terus berkembang.

Optical fiber laser dan optical amplifier sangat diminati banyak peneliti di dunia karena berbagai aplikasinya seperti pada bidang telekomunikasi, raman laser

amplifiers, sensor kimia and kesehatan (Damak, Yousef, AlFaify, Rüssel, & Maâlej, 2014). Khususnya kaca tellurite merupakan bahan yang baik untuk aplikasi optical amplifier karena berbagai keunggulannya seperti rentang transmisinya sangat lebar, dan kemungkinan untuk mendoping dengan ion tanah jarang dengan konsentrasi yang sangat besar (Susanto & Marzuki, 2014). Secara umum, kaca tellurite memiliki jangkauan transmisi yang lebih luas daripada kaca silika. Selain itu juga memiliki energi fonon yang jauh lebih rendah, dan stabilitas kaca dan ketahanan korosi lebih tinggi dari pada kaca fluoride sehingga lebih mudah di fabrikasi.

Sejalan dengan hal tersebut di atas, fabrikasi kaca tellurite yang didadah ion erbium telah berhasil dilakukan (Susanto & Marzuki, 2014) dengan komposisi  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}43\text{-x)ZnO-xEr}_2\text{O}_3$  dimana ( $x=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3$ ) (TZB:Er). Hasilnya menunjukkan bahwa nilai indeks bias kaca yang meningkat dari 1,90 sampai dengan 1,98 seiring kenaikan konsentrasi  $\text{Er}_2\text{O}_3$ . Selain itu, dalam penambahan  $\text{Er}_2\text{O}_3$  meningkatkan probabilitas absorpsi dengan metode membanding dengan nilai Cross Section. Dari hasil tersebut diketahui bahwa kaca tellurite yang didadah dengan  $\text{Er}^{3+}$  merupakan material yang menjanjikan untuk optical amplifier pada rentang  $1,5\ \mu\text{m}$ .

Untuk itu penelitian berkelanjutan perlu dilakukan sebagai upaya bersama masyarakat peneliti dunia untuk merealisasikan adanya integrated optics yang di dalamnya mengandung penguatan gelombang  $1500\text{nm}$  dengan gain/penguatan terbaik. Sehingga pada makalah ini disajikan karakteristik gain berdasarkan teori Mc Cumber untuk mengetahui emission cross section dan gain cross section sebagai bagian dari penelitian dalam menghasilkan suatu devais planar waveguide optical amplifier pada daerah operasi  $1500\text{nm}$ .

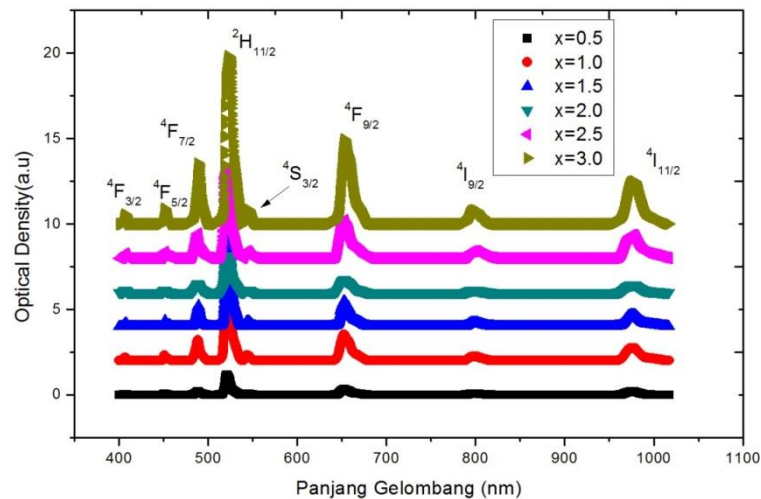
## METODE

Komposisi bahan kaca  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}43\text{-x)ZnO-xEr}_2\text{O}_3$  (TZB:Er) dimana ( $x=0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$ ) disiapkan dan dicampur kemudian dimasukkan dalam wadah crucible platina. Bahan tersebut kemudian dipanaskan pada suhu  $900^\circ\text{C}$  selama 2 jam pada furnace listrik. Pencetakan dilakukan dengan cara menuangkan leburan panas ke dalam mould (cetakan kaca) stainless steel. Hasil kaca dipanaskan pada suhu  $265^\circ\text{C}$  selama 3 jam kemudian didinginkan dengan laju  $2^\circ\text{C}/\text{menit}$  menuju suhu kamar. Selanjutnya sampel kaca diampelas hingga berkualitas optik.

Serapan optik kaca diukur menggunakan Ultra Violet-Visible Spectroscopy (UV-Vis) lambda 25. Pengukuran dilakukan pada panjang gelombang  $400\ \text{nm}$  sampai dengan  $1100\ \text{nm}$  dengan range  $0,1\ \text{nm}$ . Pengukuran nilai densitas kaca dilakukan menggunakan picnometer. Pengukuran nilai indeks bias dilakukan dengan cara pengukuran reflektansi dengan metode sudut Brewster. Laser yang digunakan adalah laser HeNe dengan panjang gelombang  $632,8\ \text{nm}$ . Semua pengukuran dilakukan pada suhu kamar.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

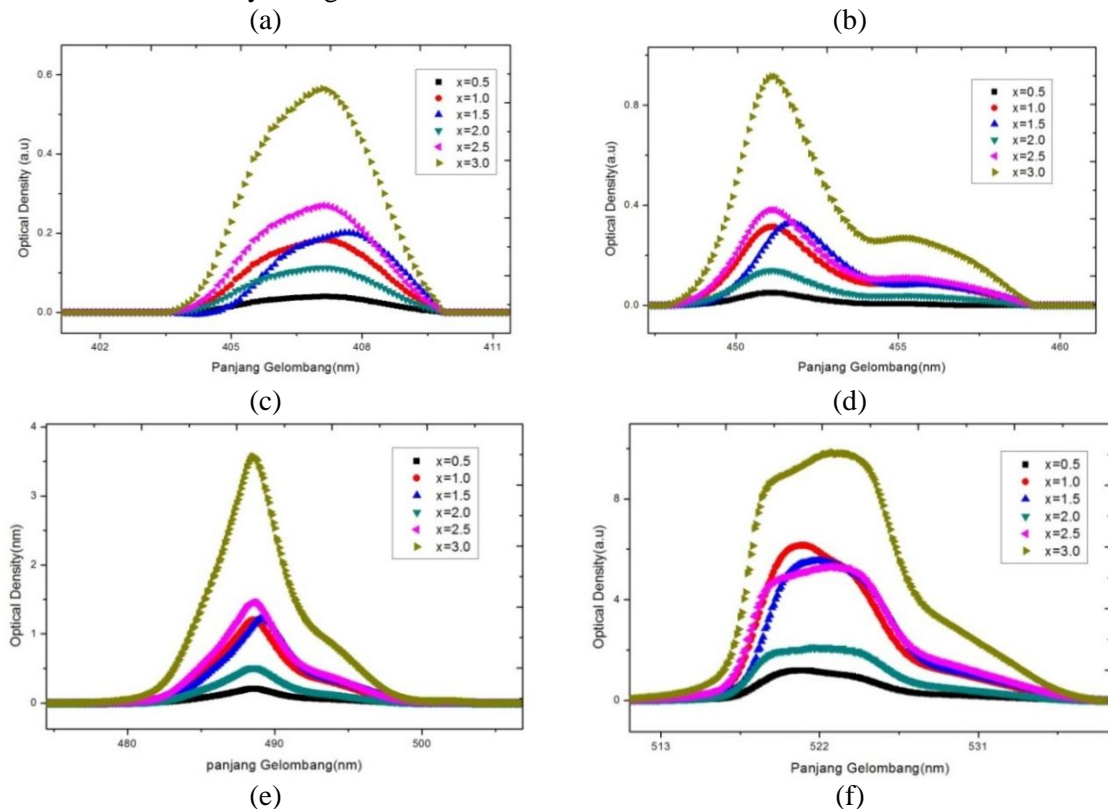
Hasil pengukuran absorpsi sampel kaca  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}43\text{-x)ZnO-xEr}_2\text{O}_3$  dimana ( $x=0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$ ) menggunakan Ultra Violet-Visible Spectroscopy (UV-Vis) lambda 25 pada panjang gelombang  $400\ \text{nm}$  sampai dengan  $1100\ \text{nm}$  dengan range  $0,1\ \text{nm}$  disajikan pada Gambar 1 dengan penyesuaian baseline dan offset menggunakan software Origin Pro 8. Pada Gambar 1 terdapat 8 puncak disekitar panjang gelombang  $408, 451, 489, 521, 544, 653, 799$  dan  $489\text{nm}$  yang bersesuaian dengan transisi dari  $^4\text{I}_{15/2}$  ke  $^4\text{F}_{3/2}, ^4\text{F}_{5/2}, ^4\text{F}_{7/2}, ^2\text{H}_{11/2}, ^4\text{S}_{3/2}, ^4\text{F}_{9/2}, ^4\text{I}_{9/2}$  dan  $^4\text{I}_{11/2}$ . Delapan puncak pada absorpsi tersebut sesuai dengan karakteristik absorpsi ion  $\text{Er}^{3+}$  (Damak et al., 2014; Sazali et al., 2014).

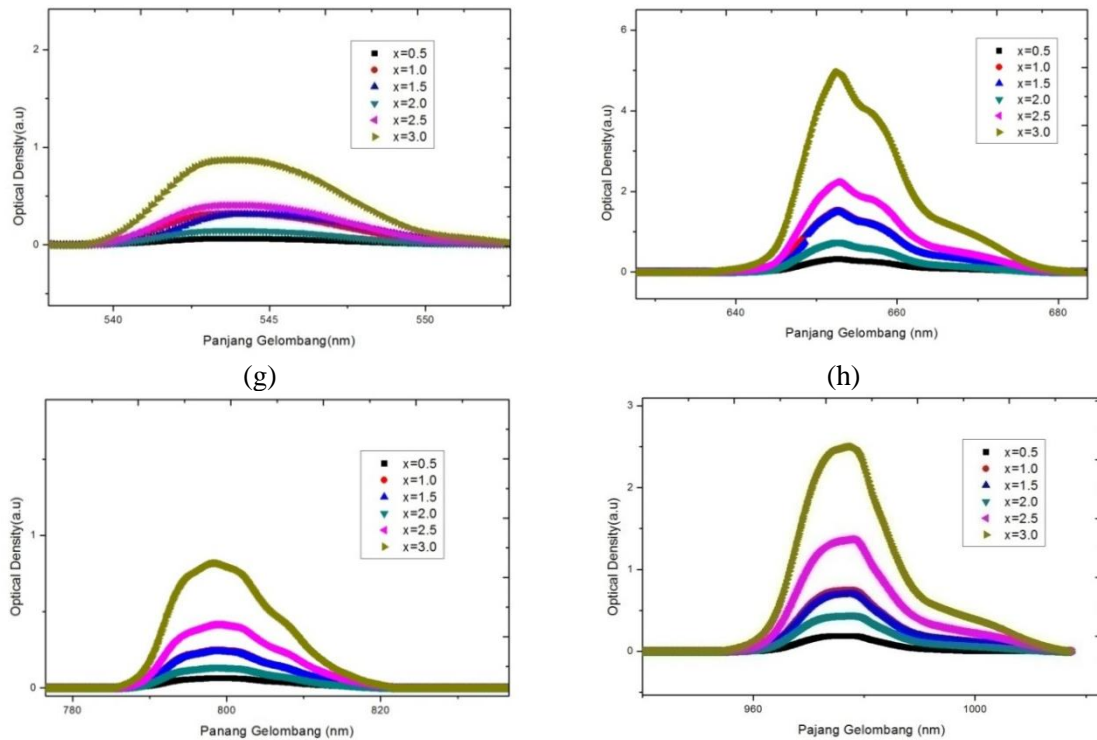


Gambar 1. Absorpsi sampel kaca  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}43\text{-x)ZnO-xEr}_2\text{O}_3$

Berdasarkan Gambar 1 tampak bahwa dengan konsentrasi pendadahan  $\text{Er}^{3+}$  yang semakin besar akan menimbulkan puncak absorpsi yang intensitasnya lebih tinggi, lebih jelas, dan lebih tajam yang tersebut tampak jelas pada sampel  $x=3,0$  hasil ini sesuai dengan penelitian (Reddy, Babu, Pradeesh, Otton, & Vijaya Prakash, 2011; Xu et al., 2003). Adanya ketidakkonsistenan optical density pada sampel  $x=2$  yang menunjukkan trend turun perlu mendapatkan perhatian khusus misalnya dengan melakukan

karakterisasi ulang pada sampel tersebut untuk memastikan nilai trendnya. Secara umum adanya perubahan kekuatan ikatan oksigen yang mempengaruhi karakteristik optical density sehingga bisa meningkat maupun menurun (Aziz, El-Mallawany, Badarom, Kamari, & Matori, 2015; Azlan, Halimah, Shafinas, & Daud, 2014). Untuk memperjelas pengaruh perubahan komposisi terhadap intensitas absorpsi tiap puncak disajikan pada Gambar 2 dari a sampai h.

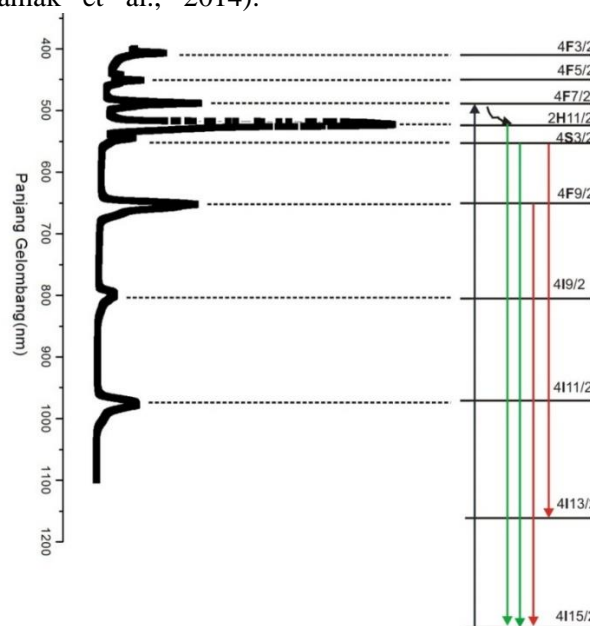




Gambar 2. Perbandingan puncak absorpsi sampel kaca  $55\text{TeO}_2-2\text{Bi}_2\text{O}_3-(43-x)\text{ZnO}-x\text{Er}_2\text{O}_3$

Gambar 3. Merupakan visualisasi level energi pada sampel kaca  $55\text{TeO}_2-2\text{Bi}_2\text{O}_3-(43-x)\text{ZnO}-x\text{Er}_2\text{O}_3$  dimana ( $x=3,0$ ) dibandingkan dengan panjang gelombang. Hasil identifikasi transisi spektroskopi adalah  $^4\text{I}_{11/2}$ ,  $^4\text{I}_{9/2}$ ,  $^4\text{F}_{9/2}$ ,  $^4\text{S}_{3/2}$ ,  $^2\text{H}_{11/2}$ ,  $^4\text{F}_{7/2}$ ,  $^4\text{F}_{5/2}$  dan  $^4\text{F}_{3/2}$  bersesuaian dengan penelitian (Damak et al., 2014).

Spektrum serapan yang paling menonjol adalah serapan pada level  $^2\text{H}_{11/2}$ . Untuk transisi  $^4\text{S}_{3/2}$  ke  $^4\text{I}_{13/2}$  tidak disajikan karena tidak dilakukan pengukuran pada transisi tersebut berkaitan keterbatasan instrumen pengukuran.



Gambar 3. Level energi pada sampel kaca  $55\text{TeO}_2-2\text{Bi}_2\text{O}_3-(43-x)\text{ZnO}-x\text{Er}_2\text{O}_3$  dimana ( $x=3,0$ )

Berdasarkan Gambar 3 puncak-puncak absorpsi atau transisi bersesuaian dari keadaan dasar (*ground state*)  $^4I_{15/2}$  ke keadaan energi  $^{2s+1}L_J$  dari  $Er^{3+}$ . Panjang gelombang yang bersesuaian dengan tingkat energi yang muncul di setiap puncak menggambarkan satu keadaan. Untuk mendapatkan tingkat energi dari setiap puncak yang menggambarkan satu keadaan, maka nilai dari panjang gelombang harus dikonversikan ke dalam nilai  $1/\text{center}$

( $\text{cm}^{-1}$ ) seperti pada Tabel 1 yang nilai bersesuaian dengan penelitian (Zhang et al., 2014). Puncak 544nm dikaitkan dengan transisi dari level  $^4S_{3/2}$  ke  $^4I_{15/2}$ , Puncak 653 nm menunjukkan emisi dari tingkat  $^4F_{9/2}$  ke  $^4I_{15/2}$ . Puncak 544 nm dikaitkan dengan transisi dari level  $^4S_{3/2}$  ke  $^4I_{13/2}$  yang merupakan keadaan tereksitasi  $Er^{3+}$  yang pertama. Puncak 521 nm dikaitkan dengan transisi  $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ .

Tabel 1. Puncak, Level Energy dan Energy

Nomor Puncak	Center (nm)	Level Energy	Energy ( $\text{cm}^{-1}$ )
1	408	$4F_{3/2}$	24510
2	451	$4F_{5/2}$	22173
3	489	$4F_{7/2}$	20450
4	521	$2H_{11/2}$	19194
5	544	$4S_{3/2}$	18382
6	653	$4F_{9/2}$	15314
7	799	$4I_{9/2}$	12516
8	980	$4I_{11/2}$	10204

Berdasarkan hasil pengukuran Gambar 1, cross section emisi dapat dihitung dengan teori Mc Cumber- Miniscalco-Quimby (Righini & Ferrari, 2005) seperti persamaan 1.

$$\sigma_{em}(v) =$$

$$\sigma_{abs}(v) e^{(E_0 - hv)/K_B T} \frac{\sum_1^{J+1/2} \exp\left[-(J-1) \frac{E_1}{K_B T}\right]}{\sum_1^{J+1/2} \exp\left[-(J-1) \frac{E_2}{K_B T}\right]} \quad 1$$

Berdasarkan persamaan 1,  $\sigma_{em}(v)$  dan  $\sigma_{abs}(v)$  adalah emisi dan absorpsi cross section,  $h$  adalah konstanta Planck,  $K_B$  adalah Konstanta Boltzman (J/K) dan  $T$  adalah temperatur derajat Kelvin.  $E_0 = E_{21} - E_{12}$  adalah perbedaan energi pada dua tingkat energi terendah pada keadaan Stark.  $E_1$  dan  $E_2$  masing-masing adalah energi pada keadaan yang lebih tinggi dan energi pada keadaan yang lebih rendah.  $E_1$  dan  $E_2$  didapatkan dari 95% energi *half width* ( $\Delta$ ) emisi dan absorpsi yang dihitung menggunakan persamaan 2 dan 3.

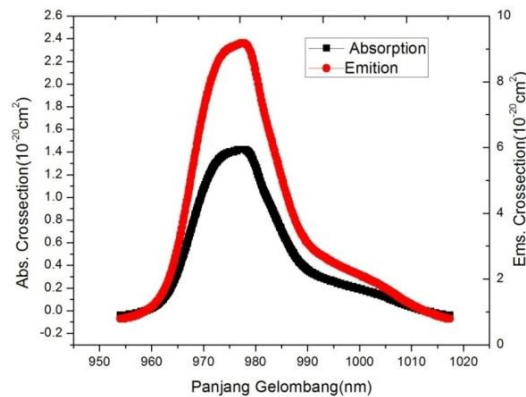
$$95\% \Delta_1 = \left[\left(J + \frac{1}{2}\right) - 1\right] E_1$$

$$2 \quad 2$$

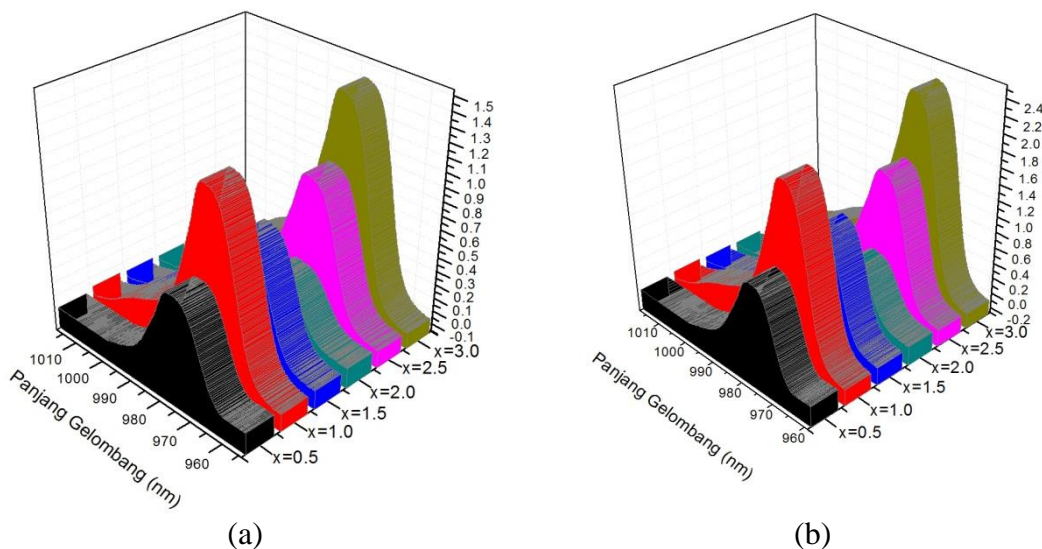
$$95\% \Delta_2 = \left[\left(J + \frac{1}{2}\right) - 1\right] E_2$$

$$3 \quad 3$$

Grafik cross section absorpsi dan emisi kaca  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}43\text{-x) ZnO-xEr}_2\text{O}_3$  dimana ( $x=3,0$ ) pada transisi  $^4I_{11/2}$  ke  $^4I_{15/2}$  dapat dilihat pada Gambar 4. Sedangkan Gambar 5 adalah grafik cross section absorpsi dan emisi untuk semua sampel. Dari gambar 5 diketahui bahwa urutan tinggi intensitas puncak cross section absorpsi dari tinggi ke rendah adalah sampel  $x=3.0 > x=1.0 > x=2.5 > x=1.5 > x=0.5 > x=2.0$  sedangkan urutan tinggi intensitas puncak cross section emisi adalah  $x=3.0 > x=1.0 > x=2.5 > x=1.5 > x=0.5 > x=2.0$ . Dengan demikian, tren urutan tinggi intensitas puncak cross section emisi sama dengan tren urutan tinggi intensitas puncak cross section absorpsi pada skenario sistem kaca yang sama.



Gambar 4. Cross section absorpsi dan emisi sampel kaca 55TeO<sub>2</sub>-2Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(43-x) ZnO-xEr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan (x=3,0)

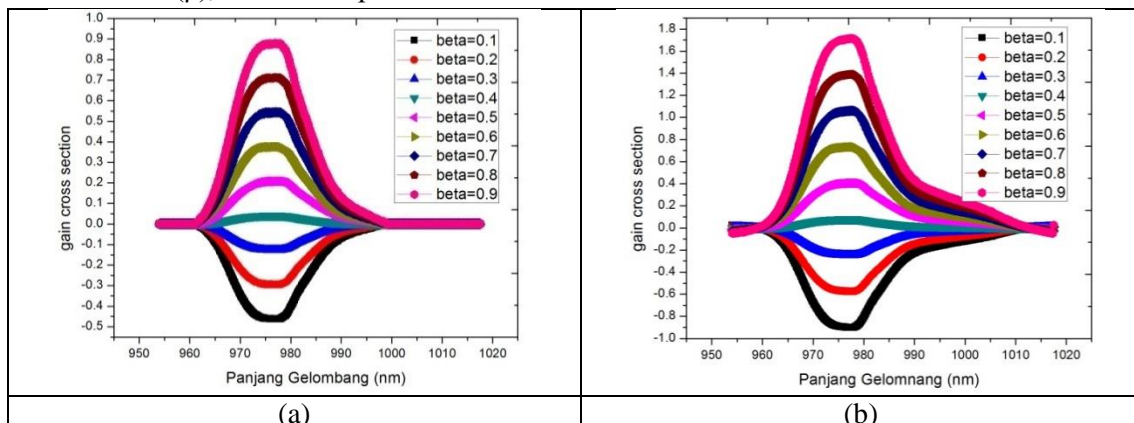


Gambar 5. Gambar (a) Cross section absorpsi dan (b) Cross section emisi sampel kaca 55TeO<sub>2</sub>-2Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(43-x) ZnO-xEr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

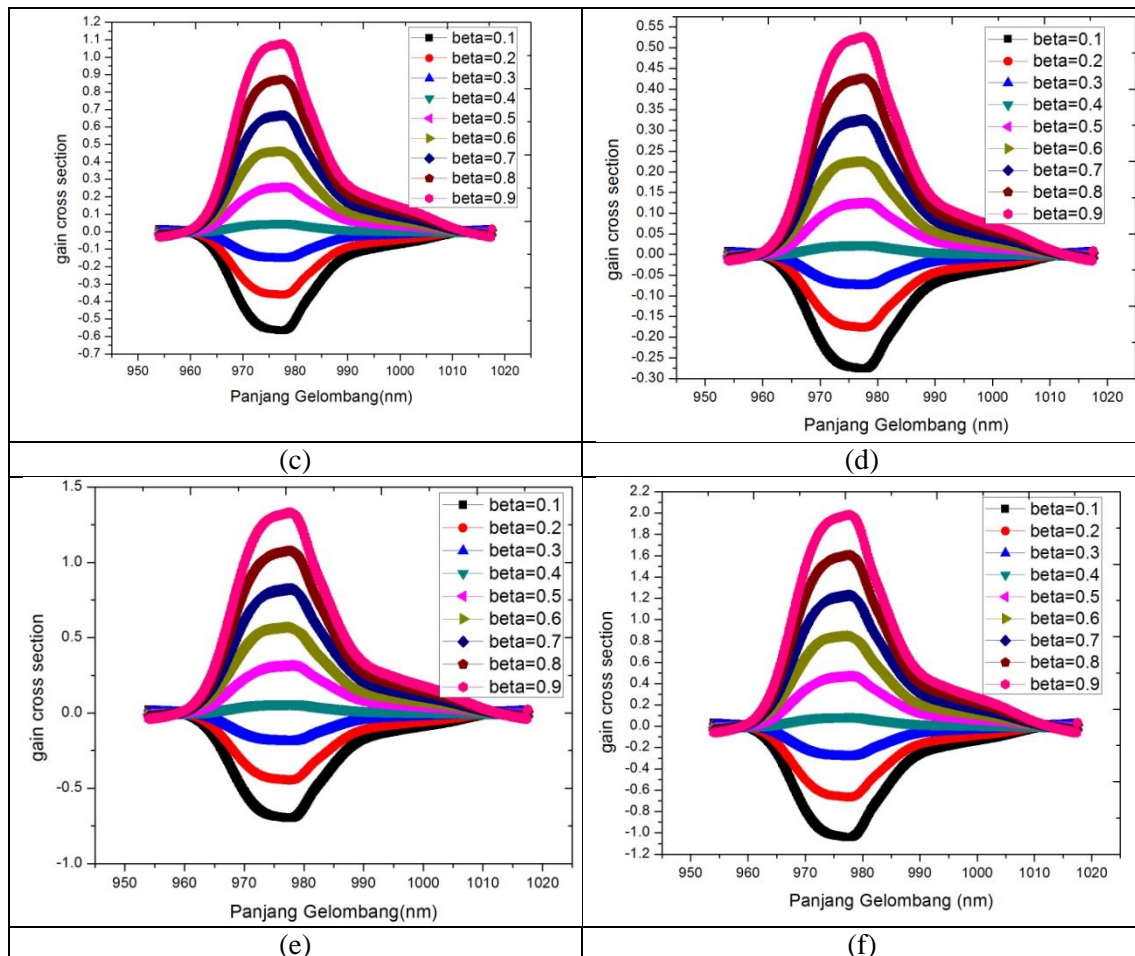
Selanjutnya menurut (Song et al., n.d.) dari cross section absorpsi dan emisi serta mempertimbangkan rasio jumlah ion yang tereksitasi terhadap jumlah ion keseluruhan ( $\beta$ ), maka dapat ditentukan

besarnya gain cross section ( $\sigma_g$ ) dengan menggunakan persamaan 4

$$\sigma_g = \beta \sigma_{em} - (1 - \beta) \sigma_{abs} \quad 4$$







Gambar 6. Gain Cross Section sampel kaca  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}43\text{-}x\text{) ZnO-}x\text{Er}_2\text{O}_3$  dimana (a) $x=0,5$ ; (b) $x=1,0$ ; (c) $x=1,5$ ; (d) $x=2,0$ ; (e) $x=2,5$ ; (f) $x=3,0$ ;

Grafik gain cross section dari  $\text{Er}^{3+}$  pada komposisi kaca  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}43\text{-}x\text{) ZnO-}x\text{Er}_2\text{O}_3$  untuk beberapa rasio inversi ( $\beta = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ) disajikan pada Gambar 6. Pada Gambar 6, yaitu grafik gain cross section emisi  $4\text{I}11/2$  ke  $4\text{I}15/2$  tampak tidak terdapat perubahan center atau pusat yaitu di  $979\text{ nm}$ , namun terdapat perubahan pola puncak dan perbedaan intensitas gain cross section seiring berubahnya rasio inversi dan komposisi. Saat rasio inversi bernilai lebih kecil dari  $0,4$  tampak bahwa puncak dari gain cross section intensitasnya bernilai negatif. Hal ini menggambarkan dengan jelas bahwa penguatan belum dapat terjadi dan absorpsi lebih dominan dari emisi. Saat rasio inversi mencapai  $0,4$  atau lebih, maka penguatan mulai muncul karena emisi lebih dominan dan dapat mengimbangi absorpsi. Berdasarkan gambar tersebut urutan tinggi intensitas puncak gain cross section pada berbagai rasio inversi dari tinggi ke rendah adalah sampel

$f > b > e > c > a > d$  atau sesuai dengan  $x=3,0 > x=1,0 > x=2,5 > x=1,5 > x=0,5 > x=2,0$ . Bentuk grafik yang dihasilkan konsisten dengan grafik gain cross section dari (Digonnet, 2001; Righini & Ferrari, 2005; Vijaya Kumar, Rama Gopal, Reddy, Lokeshwara Reddy, & Jamalalah, 2013) Puncak gain cross section bergeser ke tingkat yang lebih tinggi seiring perubahan rasio atau populasi inversi. Gambar tersebut sesuai dengan pernyataan (Righini & Ferrari, 2005) bahwa terlihat bila nilai populasi inversi rendah, maka kaca hanya akan berlaku seperti sebuah absorber dari panjang gelombang yang pendek, sementara akan menjadi amplifikasi pada gelombang yang lebih panjang.

## SIMPULAN

Pada komposisi kaca  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}43\text{-}x\text{) ZnO-}x\text{Er}_2\text{O}_3$  dimana ( $x=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3$ ) urutan tinggi intensitas puncak cross section absorpsi dari tinggi ke rendah adalah

sampel  $x=3.0 > x=1.0 > x=2.5 > x=1.5 > x=0.5 > x=2.0$ . Tren urutan tinggi intensitas puncak cross section emisi sama dengan tren urutan tinggi intensitas puncak cross section absorpsi pada skenario sistem kaca yang sama. Berkenaan gain cross section, pada semua sampel kaca saat rasio inversi mencapai 0,4 atau lebih, penguatan mulai muncul karena emisi lebih dominan dan dapat mengimbangi absorpsi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi yang telah mendanai penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aziz, S. H. A., El-Mallawany, R., Badarom, S. S., Kamari, H. M., & Matori, K. A. (2015). Optical Properties of Erbium Zinc Tellurite Glass System. *Advanced Materials Research*, 1112, 7–10. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1112.7>
- Azlan, M. N., Halimah, M. K., Shafinas, S. Z., & Daud, W. M. (2014). Polarizability and optical basicity of  $\text{Er}^{3+}$  ions doped tellurite based glasses. *Chalcogenide Letters*, 11(7), 319–335.
- Damak, K., Yousef, E., AlFaify, S., Rüssel, C., & Maâlej, R. (2014). Raman, green and infrared emission cross-sections of  $\text{Er}^{3+}$  doped TZPPN tellurite glass. *Optical Materials Express*, 4(4), 597. <https://doi.org/10.1364/OME.4.000597>
- Digonnet, M. J. F. (2001). *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers* edited by.
- Reddy, A. A., Babu, S. S., Pradeesh, K., Otton, C. J., & Vijaya Prakash, G. (2011). Optical properties of highly  $\text{Er}^{3+}$ -doped sodium-aluminium-phosphate glasses for broadband 1.5  $\mu\text{m}$  emission. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(9), 4047–4052. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.0>

1.016

- Righini, G. C., & Ferrari, M. (2005). Photoluminescence of rare-earth-doped glasses. *Rivista Del Nuovo Cimento*, 28(12), 1–53. <https://doi.org/10.1393/ncr/i2006-10010-8>
- Sazali, E. S., Rohani, M. S., Sahar, M. R., Arifin, R., Ghoshal, S. K., & Hamzah, K. (2014). Erbium concentration dependent absorbance in tellurite glass. *AIP Conference Proceedings*, 1617(Ictap 2013), 134–136. <https://doi.org/10.1063/1.4897122>
- Song, M., Wang, L., Zhang, N., Tai, X., Materials, G. W., & 2014, undefined. (n.d.). Crystal Growth and Spectroscopic Investigations of  $\text{Tm}^{3+}:\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$  Crystal. *Mdpi.Com*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1944/7/1/496/html>
- Susanto, R., & Hasanah, H. (2017). Analisis Sifat Lasing Bahan Optical Amplifier untuk Sistem Komunikasi Optik Menggunakan Aplikasi berbasis MATLAB Program Studi Teknik Informatika, STMIK Duta Bangsa Surakarta Analysis of the Laser Properties of Optical Amplifier Materials for Optical Com. *Jurnal Pendidikan Fisika Dan Keilmuan (JPFK)*, 3(2), 70–77. <https://doi.org/http://doi.org/10.25273/jpfk.v3i2.1524>
- Susanto, R., & Marzuki, A. (2014). Pengaruh Konsentrasi Ion Erbium pada Sifat Fisik dan Optik Kaca Telurium Oxide sebagai Bahan Penguat Optik. *Jurnal Materi Dan Pembelajaran Fisika (JMPF)*, 4(1), 40–44. Retrieved from <https://www.osapublishing.org/ome/abstract.cfm?uri=ome-4-4-597>
- Vijaya Kumar, M. V., Rama Gopal, K., Reddy, R. R., Lokeswara Reddy, G. V., & Jamalaiah, B. C. (2013). Luminescence and gain characteristics of 1.53  $\mu\text{m}$  broadband of  $\text{Er}^{3+}$  in lead telluroborate glasses. *Journal of*



- Luminescence*, 142, 128–134.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2013.03.059>
- Xu, S., Yang, Z., Dai, S., Yang, J., Hu, L., & Jiang, Z. (2003). Spectral properties and thermal stability of Er<sup>3+</sup>-doped oxyfluoride silicate glasses for broadband optical amplifier. *Journal of Alloys and Compounds*, 361, 313–319.
- Zhang, F. F., Zhang, W. J., Yuan, J., Chen, D. D., Qian, Q., & Zhang, Q. Y. (2014). Enhanced 2.7  $\mu\text{m}$  emission from Er<sup>3+</sup>-doped oxyfluoride tellurite glasses for a diode-pump mid-infrared laser. *AIP Advances*, 4(4), 0–11.  
<https://doi.org/10.1063/1.4870581>